МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.893 DOI 10.12737/10391

Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок*

Е. Г. Задошенко[1], В. Э. Бурлакова[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study of ferromagnetic nanoparticles effect on tribotechnical lubricating characteristics***

E. G. Zadoshenko[1], V. E. Burlakova[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Для уточнения состава синтезированных ферромагнитных частиц проводили качественный рентгенофазовый анализ методом дифрактометрии на автоматизированном приборе *ARL X΄TRA*. Для определения размеров частиц изучена водная суспензия ферромагнитных наночастиц на дисковой центрифуге *CPS Disk Centrifuge Model DC*24000. Исследования проводились методом определения трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины трения. На основе данных рентгенограмм в работе установлен состав ферромагнитных частиц, соответствующий магнетиту $FeFe_2O_4$. Обработка результатов седиментационного анализа показала полидисперсный характер полученных наночастиц магнетита. На основе трибологических исследований проведена оценка противоизносных свойств по величине диаметра пятна износа, расчет величин индекса задира, установлена несущая способность смазки по нагрузке сваривания и критической нагрузке для исследуемых смазок. Таким образом установлено, что смазочные композиции с добавками магнетита на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с содержанием магнетита 0,1 % мас. обладают высокими противозадирными и противоизносными свойствами. Увеличение содержания магнетита в смазках приводит к снижению их противоизносных свойств.

Ключевые слова: магнитные наночастицы, химическая конденсация, магнетит, смазка, трение, износ, противоизносные и противозадирные свойства.

The research objective is to study tribological properties of the lubricating compositions based on the *Castrol* oil and *ZIATIM -201* plastic lubricant modified by the ferromagnetic nanosuspension. A qualitative X-ray phase analysis by the diffractometry method is conducted on the *ARL X΄TRA* computerized system to specify the compound of the synthesized ferromagnetic nanoparticles. An aqueous suspension of ferromagnetic nanoparticles is studied on *CPS Disk Centrifuge Model DC24000* to determine the particle sizes. The investigation has been conducted by determining the tribological characteristics using four-ball machine. The preparation of lubricating compositions based on a number of sequence operations – ferromagnetic particles synthesis, their stabilization, and paste concentrate preparation – is described. On the basis of the X-ray data, it is found that the ferromagnetic particles composition corresponds to $FeFe_2O_4$ magnetite. The sedimentation analytical data processing has shown the polydisperse nature of the derived magnetite nanoparticles. Based on the tribological studies, the antiwear properties are evaluated in wear scar diameter, the load wear index value is calculated, and the bearing capacity of the lubricant according to the welding load and critical load for the lubricants under study is identified. Thus, it is found that the lubricant compositions with magnetite additives based on *ZIATIM -201* plastic lubricant and *Castrol* oil with magnetite content of 0.1% wt. offer high antiwelding and antiwear properties. Increase in the magnetite content in lubricants leads to the degradation of their antiwear properties.

Keywords: ferromagnetic nanoparticles, chemical condensation, magnetite, lubricant, friction, wear, antiwear and antiwelding properties.

Введение. В настоящее время создание новых магнитных наноматериалов [1–3] представляет собой активно развивающееся направление современной науки и техники. Изучение свойств магнитных наноматериалов позволяет установить их зависимость от химического состава, типа кристаллической решетки, степени ее дефектности, размера и формы частиц, морфологии, взаимодействия частиц с окружающей их матрицей и соседними частицами. Изменяя размеры, форму, состав и строение наночастиц, можно в определенных пределах управлять магнитными характери-

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** e-mail: zadoshenkoq@rambler.ru, vburlakova@donstu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

стиками материалов на их основе. Однако контролировать их при синтезе наночастиц удается не всегда, поэтому свойства однотипных наноматериалов могут сильно различаться [4]. Разнообразие физико-химических характеристик магнитных материалов предполагает их широкое применение в науке и технике. В первую очередь следует отметить ферромагнитные наносуспензии или магнитные жидкости [5].

В технических устройствах, в том числе подшипниковых узлах [6] магнитные жидкости используются как герметизирующие материалы для вращающих валов и аппаратов, работающих в условиях агрессивных сред, в демпфирующих устройствах и датчиках угла наклона в радиотехнике [7]. Разработанные технологические среды, смазочно-охлаждающие материалы, теплоносители на основе магнитных жидкостей и углеводородов, кремнийорганических соединений и воды дают положительный результат их применения для механической обработки металлов [8–10]. Появляются новые перспективные способы использования ферромагнитных материалов в качестве добавки к маслам и смазкам. Однако потенциальные возможности применения ферромагнитных наночастиц в технике весьма значительны и недостаточно используются. Этим обусловлена актуальность их исследований. Поэтому представляет интерес конструирование смазочных материалов с добавками ферромагнитных наночастиц, изучение особенностей их взаимодействия с поверхностью трибоконтакта и влияние на триботехнические характеристики смазок.

В связи с этим целью настоящей работы является изучение триботехнических характеристик смазочных композиций на основе «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с добавкой ферромагнитной наносуспензии.

Экспериментальная часть. Для синтеза ферромагнитных наночастиц использовали смесь солей хлорида железа (II) и хлорида железа (III) (степень чистоты — «х. ч.» в соотношении 1 : 2. К ней добавляли 1,5-кратный избыток 25 % водного раствора аммиака (степень чистоты — «ч. д. а»). Полученную суспензию черного цвета выдерживали в течение 30 минут на постоянном магните, затем отделяли образовавшиеся магнитные частицы от водного раствора солей. Полученный осадок промывали дистиллированной водой методом декантации. Операцию повторяли, пока значение *pH* раствора не достигало 6,5. Чистоту осадка контролировали на наличие ионов хлора проведением качественной реакции с нитратом серебра. Для стабилизации синтезированных ферромагнитных наночастиц использовали х. ч. олеиновую кислоту. Для полного отделения ферромагнитных наночастиц от водного раствора солей в смесь добавляли х. ч. гексан, нагревали на водяной бане. В результате проделанных операций получали пасту-концентрат.

В пластическую смазку «ЦИАТИМ-201» и моторное масло *Castrol* (*ATF Dex Multivehicle*) вводили 0,1 и 5 % мас. ферромагнитных частиц. Для этого на аналитических весах взвешивали соответственно 0,1; 5,0 г ферромагнитной суспензии, а также 99,9; 95,0 г «ЦИАТИМ-201» и моторного масла соответственно. Ферромагнитные частицы перемешивали в фарфоровой ступке со смазкой «ЦИАТИМ-201» до однородного состояния в течение 30 минут. Смазка должна быть однородной, без комков и выделяющегося масла. Однородность смазочной композиции определяли визуально. Для этого смазку наносили шпателем на предметное стекло тонким слоем и оценивали при проходящем свете ее цвет и однородность. Для приготовления смазочной композиции моторное масло перемешивалось на магнитной мешалке с ферромагнитными наночастицами в течение 30 минут при температуре 40 ºC до однородного состояния.

Качественный рентгенофазовый анализ (РФА) проводили методом дифрактометрии на автоматизированном приборе *ARL X´TRA* при излучении $Cu\ K_\alpha$ линий анода с длиной волны 1,54056 Å с *Ni*-фильтром в отраженном пучке. Экспозицию проводили в интервале 2θ от 5^0 до 70^0 при скорости сканирования 5^0/мин и температуре 25 ^{0}C.

Для определения размеров частиц проводили анализ водной суспензии ферромагнитных наночастиц на дисковой центрифуге *CPS Disk Centrifuge Model DC*24000 производства фирмы *CPS* США. Образец водной дисперсии получали обработкой в ультразвуковом поле в течение 30 минут синтезированных ферромагнитных частиц в дистиллированной воде.

Трибологические исследования проводили по ГОСТ 9490-75. В качестве трущихся поверхностей использовали четыре стальных шарика диаметром 10 мм из стали ШХ-15. Верхний шарик закрепляли во вращающемся шпинделе (частота вращения равна 1460 ± 70 мин$^{-1}$), а три нижних неподвижно располагали в обойме машины с испытуемым смазочным материалом. Диаметр пятна износа $D_И$ определяли на основе 60-минутных испытаний при постоянной нагрузке 196 Н (20 кгс). Для определения критической нагрузки $P_к$, индекса задира $И_з$ и нагрузки сваривания $P_с$ проводили 10-секундные испытания серии нагрузок [11].

Обсуждение и результаты. Получение смазок включает в себя несколько операций.

1. Предложенный В.-С. Элмором [12, 13] синтез высокодисперсного магнетита Fe_3O_4 по методу химической конденсации (ХК) по реакции:

$$2FeCl_3 + FeCl_2 + 8NH_4OH = Fe_3O_4 + 8NH_4Cl + 4H_2O.$$

2. Пептизация осадка и промывка водой от растворимых солей для предотвращения коагуляции частиц магнетита и обеспечения хорошей адсорбционной способности с молекулами стабилизатора.

3. Стабилизация ферромагнитных частиц. Условием эффективной стабилизации частиц является совместимость феррофазы, стабилизатора и дисперсионной среды [14]. При этом наилучшими стабилизаторами оказываются вещества, хорошо растворяющиеся в дисперсионной среде. Их стабилизирующее действие объясняется понижением поверхностной энергии диспергированных частиц и увеличением абсолютной величины их электрокинетического потенциала, а также структурно-механических и стерических факторов. Выбор стабилизатора зависит от свойств несущей жидкости. Для магнитной жидкости на основе углеводородов в качестве стабилизатора используют поверхностно-активные вещества (ПАВ) — например, олеиновую кислоту или ее соли [15]. В настоящей работе стабилизацию ферромагнитных частиц осуществляли добавлением стабилизирующей смеси из расчета: магнетит (60–65 % мас.) — ПАВ (олеиновая кислота, 10–15 % мас.) — основа (гексан, 15–20 % мас.).

4. Получение пасты-концентрата и на ее основе создание смазочных композиций. Для уточнения состава синтезированных ферромагнитных частиц проводили качественный рентгенофазовый анализ (РФА) (рис. 1). Его результаты свидетельствуют о том, что синтезированные ферромагнитные частицы имеют состав Fe_3O_4 — магнетит класса обращенных шпинелей с кристаллической решеткой шпинели благородной $MgAl_2O_4$ [16] и общей формулой $MeFe_2O_4$.

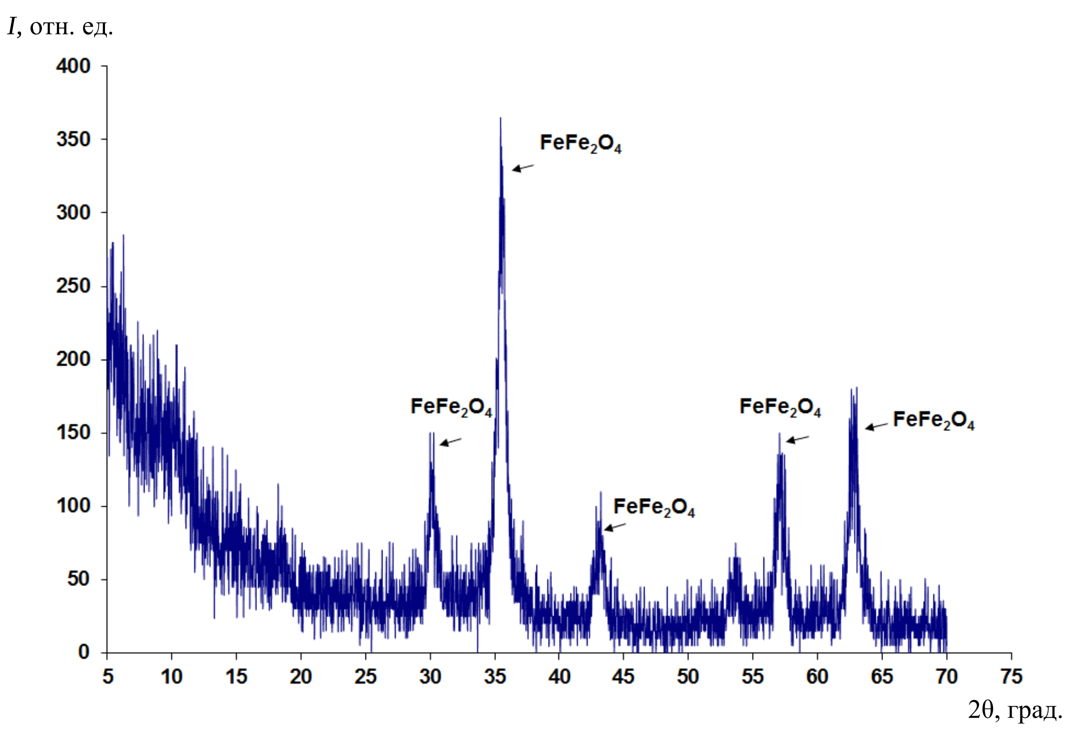


Рис. 1. Рентгенограмма ферромагнитных наночастиц

Размер ультрадисперсных ферромагнитных частиц определяли методом седиментационного анализа. Его результаты свидетельствуют о том, что 95 % частиц находится в диапазоне от 50 до 100 нм, с максимумом в 64 нм — 25 %. Таким образом, анализируемая дисперсия наночастиц магнетита имеет полидисперсный характер, а первичными кластерами магнетита являются кластеры с размером до 64 нм (рис. 2).

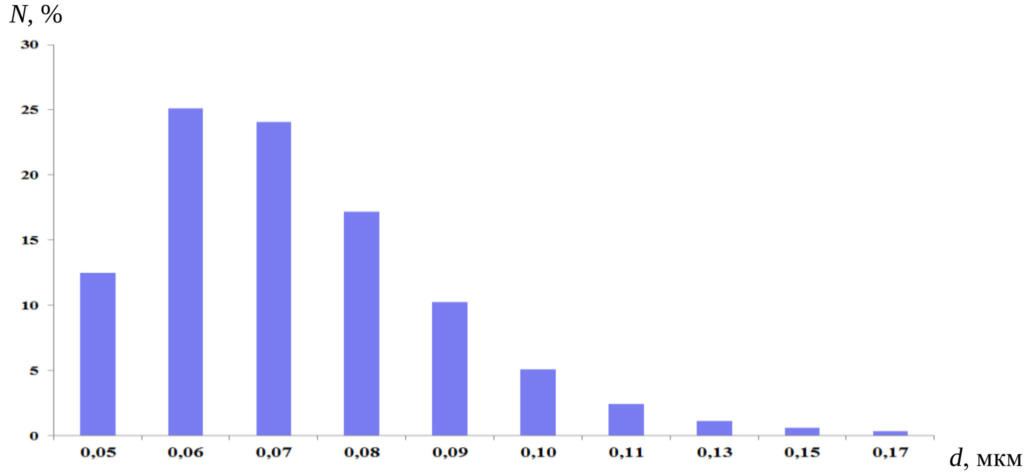


Рис. 2. Гистограмма распределения частиц магнетита по размерам

Триботехнические свойства сконструированных смазочных материалов (табл. 1) исследовали с использованием четырехшариковой машины трения ЧШМ-1.

Таблица 1

Состав исследуемых смазок

№ смазки	Состав
1	ЦИАТИМ-201
2	ЦИАТИМ-201 + 0,1 % наночастиц магнетита
3	ЦИАТИМ-201 + 5 % наночастиц магнетита
4	Масло *Castrol*
5	Масло *Castrol* + 0,1 % наночастиц магнетита
6	Масло *Castrol* + 5 % наночастиц магнетита

Противоизносные свойства смазок оценивали по величине диаметра пятна износа $D_и$ (рис. 3).

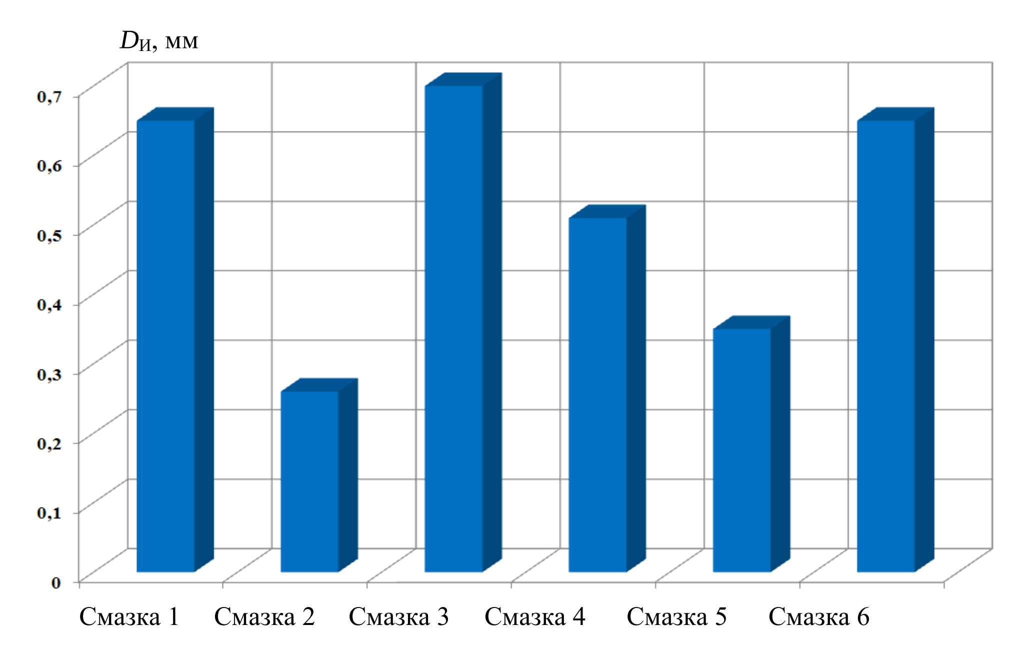


Рис. 3. Диаметр пятна износа для исследуемых смазок

Из гистограммы (рис. 3) следует, что значение $D_и$ для смазочной композиции с содержанием магнетита 0,1 % значительно ниже, чем для «ЦИАТИМ-201», однако при увеличении содержания магнетита наблюдается увеличение диаметра пятна износа. Аналогичные результаты обнаружены для масла *Castrol* с добавкой магнетита (рис. 3). С увеличением содержания магнетита в пластической смазке и масле диаметр пятна износа увеличивается, что связано, по-видимому, с появлением абразивного износа [17]. В соответствии с полученными результатами более эффективной является смазочная композиция с содержанием магнетита 0,1 % как для пластической смазки «ЦИАТИМ-201», так и для масла *Castrol*.

Для определения качества смазывающего действия смазочных композиций (табл. 1) проводили 10-секундные испытания по определению противозадирных свойств смазок (индекс задира $И_з$), способности смазки предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей (критическая нагрузка $P_к$) и предельной работоспособности смазки (нагрузка сваривания $P_с$).

Значения критической нагрузки, при которой начинается разрушение смазочной пленки, и условия трения и износа при использовании различных смазок представлены на рис. 4. Смазочная композиция с добавлением 1 % частиц магнетита демонстрирует худшие показатели, чем чистая пластическая смазка и состав с 5-процентной добавкой

магнетита. При высоком содержании магнетита в масле *Castrol* значение критической нагрузки возрастает, при малом ее содержании — не изменяется.

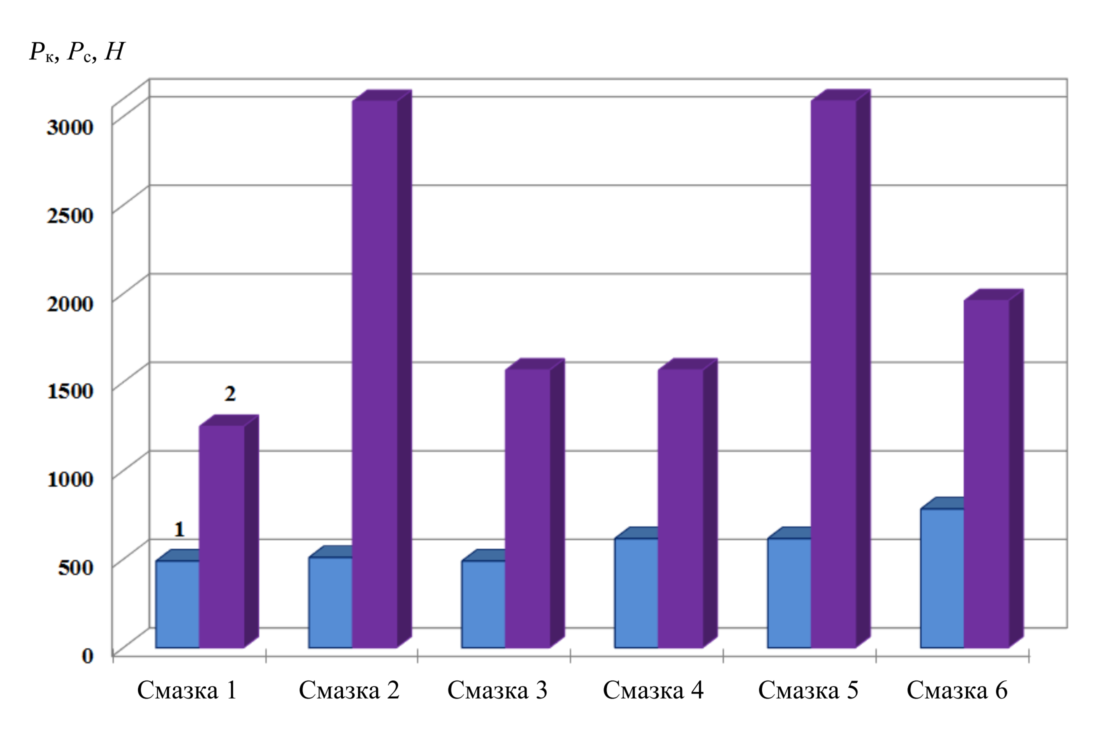


Рис. 4. Гистограмма значений критической нагрузки (1) и нагрузки сваривания (2) для исследуемых смазок

Результаты трибологических исследований свидетельствуют о том, что добавка магнетита приводит к увеличению индекса задира (рис. 5) для смазочных композиций как на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201», так и масла *Castrol*. Однако с ростом содержания магнетита наблюдается тенденция к снижению значений $И_з$. Таким образом, обнаружена область оптимального содержания добавки магнетита, при которой возможно предотвращение возникновения задира трущихся поверхностей. Для смазочных композиций с добавкой магнетита нагрузка сваривания, характеризующая полный разрыв смазки и потерю ее несущей способности, выше, чем для чистых смазок (рис. 4). Однако увеличение содержания магнетита приводит к снижению несущей способности смазочного материала.

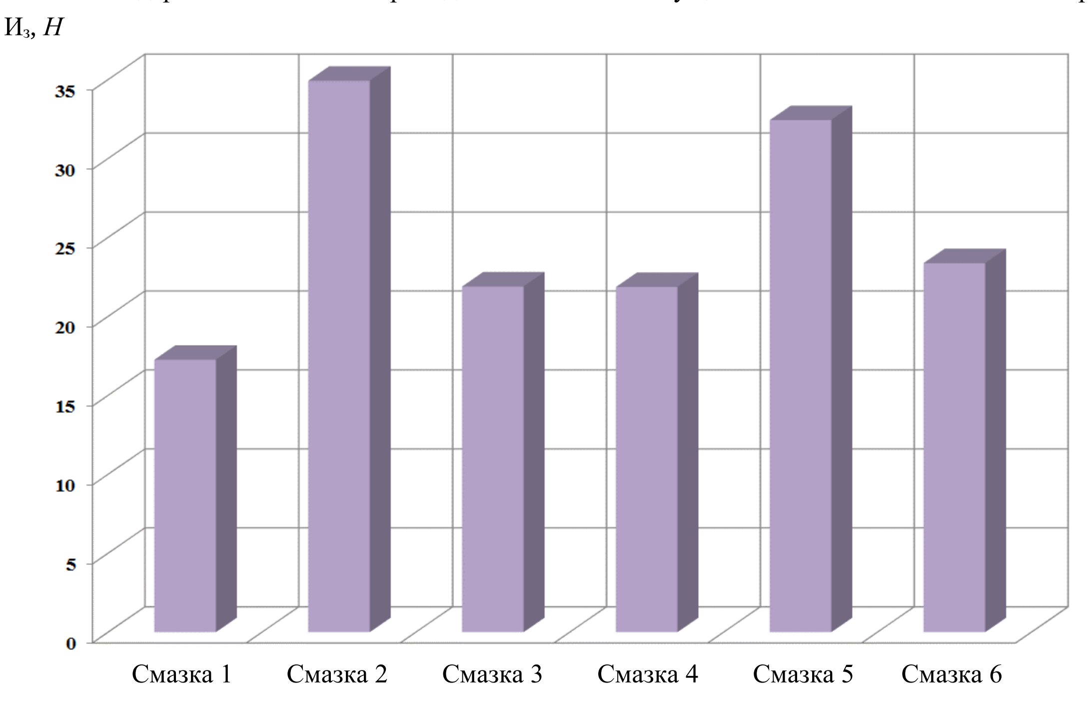


Рис. 5. Гистограмма значений индекса задира для исследуемых смазок

Таким образом, содержание магнетита в количестве 0,1 % мас. в составе смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* приводит к улучшению триботехнических показателей смазочных композиций. Это может быть связано с образованием частицами магнетита и ПАВ определенной структуры [18], характеризующейся низким сопротивлением сдвигу и уменьшением интенсивности изнашивания поверхностей в местах их соприкосновения [19]. С увеличением же содержания магнетита происходит его коагуляция в процессе трения, что вызывает абразивный износ и снижение триботехнических характеристик изученных смазочных композиций.

Выводы: Методом химической конденсации синтезированы ферромагнитные наночастицы, стабилизированные олеиновой кислотой. Фазовый состав магнетита класса обращенных ферритов-шпинелей $FeFe_2O_4$, средний размер — 64 нм. Обнаружено, что смазочные композиции с добавками магнетита на основе пластической смазки «ЦИАТИМ-201» и масла *Castrol* с содержанием магнетита 0,1 % мас. обладают высокими противозадирными и противоизносными свойствами. Увеличение содержания магнетита в смазках приводит к снижению их противоизносных свойств.

Библиографический список

1. Lu, A.-H. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization and application / A.-H. Lu, E.-L. Salabas, F. Schuth // Angewandte Chemie International Edition. — 2007. — Vol. 46, iss. 8. — P. 1222–1244.

2. Nickel nanoparticles obtained by a modified polyol process: synthesis, characterization, and magnetic properties / G.-G. Couto [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. — 2007. — Vol. 311, iss. 2. — P. 461–468.

3. Gherca, D. Synthesis, characterization and magnetic properties of MFe_2O_4 ($M = Co, Mg, Mn, Ni$) nanoparticles using ricin oil as capping agent / D. Gherca // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2012. — Vol. 324, iss. 24. — P. 3906–3911.

4. Баранов, Д. А. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза / Д. А. Баранов, С. П. Губин // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2009. — Т. 1, № 1/2. — С. 129–147.

5. Pileni, M.-P. Magnetic fluids: fabrication, magnetic properties and organization of nanocrystals / M.-P. Pileni // Advanced Functional Materials. — 2001. — Vol. 11, № 5. — P. 323–336.

6. Подгорков, В. В. Повышение долговечности, надежности и трибологической безопасности технических устройств путем применения магнитных жидкостей / В. В. Подгорков // Вестник Ивановского гос. энергетич. ун-та. — 2005. — Вып. 3. — С. 70–74.

7. Магнитные жидкости в машиностроении / под общ. ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. — Москва : Машиностроение, 1993. — 272 с.

8. Лапочкин, А. И. Использование магнитных жидкостей в качестве смазки в мелкомодульных зубчатых передачах / А. И. Лапочкин // Вестник машиностроения. — 2002. — № 6. — С. 34–36.

9. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты [и др.] // Трение и износ. — 2002. — Т. 23, № 4. — С. 411–424.

10. Перекрестов, А. П. Механизм действия противоизносной присадки на магнитной основе / А. П. Перекрестов, В. А. Непомнящий // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. — 2008. — № 2 (43). — С. 46–50.

11. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине : ГОСТ 9490-75 / Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР ; Государственный комитет стандартов Совета министров СССР. — Москва : Издательство стандартов, 1987. — 8 с.

12. Elmore, W.-C. Ferromagnetic Colloid for Studying Magnetic Structures / W.-C. Elmore // Physical Review. — 1938. — Vol. 54, № 5. — № 309–310.

13. Synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles without surfactants at room temperature / I. Martinez-Mera [et al.] // Materials Letters. — 2007. — Vol. 61, iss. 23–24. — P. 4447–4451.

14. Губин, С. П. Что такое наночастица? Тенденции развития нанохимии и нанотехнологии / С. П. Губин // Российский химический журнал (Журнал Рос. хим. общ-ва им. Д. И. Менделеева). — 2000. — Т. 44, № 6. — С. 23–31.

15. Preparation and properties of an Aqueous Ferrofluid / P. Berger [et al.] // Journal of Chemical Education. — 1999. — Vol. 76, № 7. — P. 943–948.

16. Комлев, А. А. Формирование наночастиц железо-магниевой шпинели при дегидрации соосажденных гидроксидов магния и железа / А. А. Комлев, С. Илхан // Наносистемы: физика, химия, математика. — 2012. — Т. 3, № 4. — С. 114–121.

17. Вернигоров, Ю. М. Разрушение частиц ферромагнитного материала в магнитовибрирующем слое с высокой порозностью / Ю. М. Вернигоров, Н. Н. Фролова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 7 (58). — С. 1127–1131.

18. Квантовохимическое исследование взаимодействия спиртов с ювенильной поверхностью меди / А. С. Кужаров [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2004. — Т. 4, № 4 (22). — С. 485–488.

19. Мельников, А. Ф. Эффективность применения присадок на основе частиц твердых материалов при приработке деталей двигателей внутреннего сгорания / А. Ф. Мельников // Известия Самарского науч. центра Рос. академии наук. — 2011. — Т. 13, № 4 (3). — С. 1116–1118.

References

1. Lu, A.-H., Salabas, E.-L., Schuth, F. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization and application. Angewandte Chemie International Edition, 2007, vol. 46, iss. 8, pp. 1222–1244.

2. Couto, G.-G., et al. Nickel nanoparticles obtained by a modified polyol process: synthesis, characterization, and magnetic properties. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, vol. 311, iss. 2, pp. 461–468.

3. Gherca, D. Synthesis, characterization and magnetic properties of MFe_2O_4 (M = Co, Mg, Mn, Ni) nanoparticles using ricin oil as capping agent. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, vol. 324, iss. 24, pp. 3906–3911.

4. Baranov, D. A., Gubin, S. P. Magnitnye nanochastitsy: dostizheniya i problemy khimicheskogo sinteza. [Magnetic nanoparticles: achievements and problems of chemical synthesis.] Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii. 2009, vol. 1, no. ½, pp. 129–147 (in Russian).

5. Pileni, M.-P. Magnetic fluids: fabrication, magnetic properties and organization of nanocrystals. Advanced Functional Materials, 2001, vol. 11, no. 5, pp. 323–336.

6. Podgorkov, V. V. Povyshenie dolgovechnosti, nadezhnosti i tribologicheskoy bezopasnosti tekhnicheskikh ustroystv putem primeneniya magnitnykh zhidkostey. [Increasing the durability, reliability, and tribological safety of technological devices by applying magnetic fluids.] Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University, 2005, iss. 3, pp. 70–74 (in Russian).

7. Orlov, D. V., Podgorkov, V. V., eds. Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii. [Magnetic fluids in industry.] Moscow: Mashinostroenie, 1993, 272 p. (in Russian).

8. Lapochkin, A. I. Ispol'zovanie magnitnykh zhidkostey v kachestve smazki v melkomodul'nykh zubchatykh peredachakh. [Application of ferrofluid lubricants in the finegrained gear drives.] Vestnik mashinostroeniya, 2002, no. 6, pp. 34–36 (in Russian).

9. Luty, M., et al. Metodologiya sozdaniya smazochnykh materialov s nanomodifikatorami. [Methods of creating lubricating materials with nanomodifiers.] Friction and Wear, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 411–424 (in Russian).

10. Perekrestov, A. P., Nepomnyashchiy, V. A. Mekhanizm deystviya protivoiznosnoy prisadki na magnitnoy osnove. [Mechanism of antiwear magnetic additive.] Vestnik of Astrakhan State Technical University, 2008, no. 2 (43), pp. 46–50 (in Russian).

11. Materialy smazochnye zhidkie i plastichnye. Metod opredeleniya tribologicheskikh kharakteristik na chetyrekhsharikovoy mashine: GOST 9490-75. [GOST 9490-75. Liquid lubricating and plastic materials. Method of test for lubricating properties on four ball machine.] Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry of the USSR; State Committee for Standards of Council of Ministers of the USSR. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987, 8 p. (in Russian).

12. Elmore, W.-C. Ferromagnetic Colloid for Studying Magnetic Structures. Physical Review, 1938, vol. 54, no. 5, pp. 309–310.

13. Martinez-Mera, I., et al. Synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles without surfactants at room temperature. Materials Letters, 2007, vol. 61, iss. 23–24, pp. 4447–4451.

14. Gubin, S. P. Chto takoe nanochastitsa? Tendentsii razvitiya nanokhimii i nanotekhnologii. [What is a nanoparticle? Trends in the development of nanochemistry and nanotechnology.] Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Journal of Mendeleev Russian Chemical Society), 2000, vol. 44, no. 6, pp. 23–31 (in Russian).

15. Berger, P., et al. Preparation and properties of an Aqueous Ferrofluid. Journal of Chemical Education, 1999, vol. 76, no. 7, pp. 943–948.

16. Komlev, A. A., Ilhan, S. Formirovanie nanochastits zhelezo-magnievoy shpineli pri degidratsii soosazhdennykh gidroksidov magniya i zheleza [Formation of iron-magnesium spinel nanoparticles under dehydration of coprecipitated hydroxides of magnesium and iron.] Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 114–121 (in Russian).

17. Vernigorov, Y. M., Frolova, N. N. Razrushenie chastits ferromagnitnogo materiala v magnitovibriruyushchem sloe s vysokoy poroznost'yu. [Destruction of ferromagnetic material particles in magnetovibrating layer with high porosity.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 7 (58), pp. 1127–1131 (in Russian).

18. Kuzharov, A. S., et al. Kvantovokhimicheskoe issledovanie vzaimodeystviya spirtov s yuvenil'noy poverkhnost'yu medi. [Quantum-chemical study on the interaction of alcohols with juvenile copper surface.] Vestnik of DSTU, 2004, vol. 4, no. 4 (22), pp. 485–488 (in Russian).

19. Melnikov, A. F. Эффективность применения присадок на основе частиц твердых материалов при приработке деталей двигателей внутреннего сгорания [Efficiency of using additives based on solid material particles during break-in period of the ICE parts.] Izvestiya Samarskogo nauch. tsentra Ros. akademii nauk, 2011, vol. 13, № 4 (3), pp. 1116–1118 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.11.2014
Сдана в редакцию 19.11.2014
Запланирована в номер 28.01.2015